Aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
der Universität Tübingen
Direktor: Prof. Dr. med. D. Plester

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE MECHANIK DER GEHÖRKNÖCHELCHENKETTE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER STAPESFUSSPLATTE

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

dem Fachbereich Klinische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Beate Angelika Kreutzer, geb. Rauser
aus Stuttgart-Bad Cannstatt

1978

Aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten
der Universität Tübingen
Direktor: Prof. Dr. med. D. Plester

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE MECHANIK DER GEHÖRKNÖCHELCHENKETTE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER STAPESFUSSPLATTE

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

dem Fachbereich Klinische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Beate Angelika Kreutzer, geb. Rauser
aus Stuttgart-Bad Cannstatt

1978

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. H.-E. Hoffmeister
Berichterstatter: Professor Dr. J. Helms
(Professor Dr. D. Plester)

Inhaltsverzeichnis Seite

I. Einleitung

1. Vorbemerkung 1
2. Angaben zur Anatomie der Gehörknöchelchenkette 3
2.1 Hammer 3
2.2 Amboß 4
2.3 Stapes 4
3. Angaben zur Funktion der Gehörknöchelchenkette 5
3.1 Schalldruck-Transformation 5
3.2 Hebelwirkung 7
3.3 Schutzfunktion 8
4. Schwingungsverhalten der Gehörknöchelchenkette im gesunden Mittelohr 10
4.1 Lage der Bewegungsachsen 11
4.2 Massenverteilung der Gehörknöchelchen 12
4.3 Schwingungsformen des Stapes 13
5. Schwingungsamplituden der Gehörknöchelchen 13

II. Problemstellung 14

III. Methoden 14

1. Allgemeines 14
1.1 Mechanische Sonden 15
1.2 Kapazitative Sonden 15
1.3 Reflektionsbestimmungen mit aufgeklebten Spiegeln 15
2. Stroboskopie 16
2.1 Allgemeines 16
2.2 Technischer Aufbau des Mikrostroboskops 17
2.2.1 Beleuchtungsteil 17
2.2.2 Schallapplikation 18

IV. Experimentelle Untersuchungen 20

1. Felsenbeinpräparate 20
1.1 Entnahme 20
1.2 Postmortale Veränderungen 20
1.3 Lagerung 21
1.4 Präparation 22
2. Versuchsanordnung 25
3. Versuchsauswertung 26
3.1 Beobachtung und Beschreibung 26
3.2 Photographische Auswertung 27
3.3 Auswertung mit dem Okularmikrometer 30
3.3.1 Eichung 30
3.3.2 Messgenauigkeit 30
4. Versuchsergebnisse 31
4.1 Messwerte 31
4.2 Beobachtungen 39

V. Diskussion 41

VI. Zusammenfassung 44

VII. Literaturverzeichnis 45

I. Einleitung

1. Vorbemerkung

Im Rahmen der modernen Antibiotikatherapie und durch die Verbesserung der otochirurgischen Operationstechnik ist es heute möglich, Operationen mit dem alleinigen Ziel der Gehörverbesserung vorzunehmen. (Plester, 1970 (41)). Die Voraussetzung dazu ist die Erforschung der Funktionsprinzipien des Gehörorganes, insbesondere von Trommelfell und Mittelohr.

Die ersten Angaben über die Funktion der Gehörknöchelchenkette liefert uns Colombo im 16. Jahrhundert (13). Er beschrieb die Gehörknöchelchenkette als einen Mechanismus zur Übertragung der Trommelfellschwingungen auf das Innenohr. Unsere heutigen Kenntnisse über die Mechanik und die Funktion der Gehörknöchelchen basieren weitgehend auf den Forschungen von Helmholtz (24) und Mach und Kessel (38). Völlige Übereinstimmung in der Frage der Schallübertragung konnte jedoch nicht erreicht werden. So bezweifelte z.B. Beyer (9) die Übertragung des Schalls durch die Gehörknöchelchenkette.

Nach Untersuchungen von Wever und Lawrence (54,55, 56) und anderen (8, 30, 35) müssen die unterschied-

lichen Schallwiderstände (Impedanzen) beim Übergang der Schallwellen vom Medium Luft zum Medium Wasser bzw. Cochleaflüssigkeit durch einen Transformationsmechanismus einander angeglichen werden. Dies ist die Aufgabe des Mittelohres.

Die Anatomie der Gehörknöchelchenkette, insbesondere die langen Fortsätze von Malleus und Incus führten zu der Vermutung, ihre Aufgabe bestehe neben der Schallübertragung auch in einer Schallverstärkung. Helmholtz (24), Dahmann (14) und Kobrak (35) gelang es, dieses Hebelverhältnis in Zahlen auszudrücken.

Eine weitere Erklärung für den Bau der Gehörknöchelchenkette sucht man in der Annahme, daß das Mittelohr dazu diene, das Innenohr vor zu starken Schallreizen zu bewahren. (11, 24, 54)

Die vorliegende Arbeit soll versuchen, die Schwingungsamplituden der Gehörknöchelchen und den Ossiculahebel in Zahlen anzugeben. Sie soll somit ein Beitrag sein zur Aufklärung der Funktion der Gehörknöchelchenkette und der Stapesfußplatte im gesunden menschlichen Ohr.

2. Angaben zur Anatomie der Gehörknöchelchenkette

Hammer und Amboß als Teile der Gehörknöchelchenkette wurden von Vesalius (53) schon im Jahre 1543 beschrieben; den Stapes fand 1546 Ingrassia. Physiologie und Anatomie des Mittelohres wurde eingehend von Helmholtz bearbeitet (Publikation 1868 in Pflüger's Archiv) (24, 25). Er erforschte die Gestalt der Gehörknöchelchen, ihre Gelenkverbindungen und die Aufhängung im Cavum tympani.

2.1 Hammer

Das Manubrium mallei ist in seiner ganzen Länge mit dem Trommelfell verwachsen. Während am Umbo eine besonders feste Verbindung vorliegt, ist sie im Bereich des Processus lateralis eher gelenkähnlich und erlaubt geringe Verschiebungen.
Von der Spina tympanica major zieht das Ligamentum mallei anterius zum Collum mallei und zum Processus anterior. Das Ligamentum mallei laterale reicht von einer Knochenleiste im Collumbereich des Hammers bis zur Incisura tympanica und schickt seine hinteren Fasern als Ligamentum mallei posticum zur Spina tympanica posterior. Helmholtz nannte das Ligamentum mallei posticum und Teile des Ligamentum mallei

anterius "Achsenband", da es die gemeinsame Bewegungsachse der Ossicula bildet. Das Ligamentum mallei superius zieht vom Caput mallei zum Dach des Recessus epitympanicus und hemmt nach Helmholtz eine zu starke Auswärtsbewegung des Hammerkopfes. Auch Faserzüge der beiden anderen Hammerbänder verhindern zu heftige Ausschläge. Die Spannung der Hemmungsbänder wird durch den Musculus tensor tympani reguliert. (24, 25)

2.2 Amboß

Das Crus longum incudis verläuft parallel zum Manubrium und mündet im medianwärts gekrümmten Processus lenticularis. Das Crus breve incudis ist durch straffe Bänder in der Verlängerung des Achsenbandes in der Fossa incudis ohne Knochenberührung aufgehängt. Die Verbindung zum Hammer bildet ein Sattelgelenk mit "Sperrzähnen", die bei der Einwärtsbewegung einrasten. Die Gelenkkapsel ist zart und zerreißt leicht. (24, 25)

2.3 Stapes

Die Gelenkfläche des Processus lenticularis entspricht einem flachen, gegen den Stapes convexen Kugelabschnitt. Die Basis des Stapes wird von einer elastischen faserknorpeligen Lippe umsäumt und durch das

Ligamentum anulare ins ovale Fenster eingefügt. Das Caput stapedis bildet den Ansatz für den M. stapedius, der wie der M.tensor tympani durch Zug die Bewegungsausschläge der Gehörknöchelchenkette dämpft. (24, 25).

Diese Angaben über die Anatomie der Gehörknöchelchenkette wurden in den folgenden Jahrzehnten durch andere Untersucher immer wieder bestätigt (35, 47).

Mach und Kessel (38) gelangten jedoch 1874 bei ihren Arbeiten über das Mittelohr zu der Ansicht, daß sich bei der Prüfung verschiedener Ohrpräparate nach derselben Methode große individuelle Variationen in Form, Lage und Achsen der Gehörknöchelchen ergeben. Auch Beyer (9) fand eine große Variationsbreite in der Anordnung und Ausbildung der Gehörknöchelchen. Mink (39) und Frank (16) stellten die "Sperrzahntheorie" (Helmholtz) in Frage.

3. Angaben zur Funktion der Gehörknöchelchenkette

3.1 Schalldruck-Transformation

Bei der Entwicklung vom Wasser- zum Landtier ergab sich unter anderem das Problem der Wahrnehmung von Schallreizen aus der umgebenden Luft.

Bei der Schallübertragung im Wasser sind die akustischen Widerstände beim Eindringen in den schwimmenden Organismus so gering, daß ein Transformations-

mechanismus nicht nötig ist. An Land wäre das Fehlen eines Übertragungssystems mit einem Energieverlust von etwa 99,9 % verbunden, da der Schall beim Übergang vom Medium Luft ins Medium Wasser bzw. Cochleaflüssigkeit im Säugerohr erhebliche Widerstände überwinden muß. (3,8,30,35,48,49,54,56,57)

Bei Reptilien und Vögeln ist dieses Problem auf einfache Art gelöst. Hier wird der Schall durch ein säulenförmiges, leicht abgewinkeltes Knöchelchen-System, die Columella, auf die Perilymphe des Innenohres übertragen. (1,30,56,58) Dieses System hat sich für die innerhalb dieser Tierarten vorkommenden Schallreize als außerordentlich leistungsfähig erwiesen. (54,56)

In der weiter aufsteigenden Tierreihe wird aus dem einfachen Ohr, bestehend aus Trommelfell, Extracolumella, Collumella und Stapes, die dreiteilige Gehörknöchelchenkette der Säuger. (30) Sie entsteht in ihren oberen Anteilen (Hammerkopf und Amboßkörper) aus dem Mesenchym des ersten Kiemenbogens, während die unteren Anteile (Hammergriff und langer Amboßfortsatz) von Zellhaufen aus dem Mesenchym des zweiten Kiemenbogens gebildet werden. Der Stapes entwickelt sich aus dem zweiten Kiemenbogen und der Labyrinthkapsel. (2,28,35)
Beim Säuger und damit auch beim Menschen sichert die Gehörknöchelchenkette die Ankopplung des Trommelfells

an das Mittelohr und vermeidet damit eine hochgradige Schalleitungsschwerhörigkeit.

3.2 Hebelwirkung

Die Ausbildung der Gehörknöchelchenkette mit den langen Armen von Malleus und Incus legte schon früh die Vermutung nahe, daß es sich hier neben der reinen Fortleitung des Schalles um einen Mechanismus zur Verstärkung des Schalldrucks handle. (3,4,7,8,12,14, 19,21,23,24,35,39,22,30,47,48,49,50,51,52,54,57). Helmholtz (24,25) beschrieb die Gehörknöchelchenkette als einen einarmigen Hebel mit dem Crus breve des Incus als Hypomochlion, mit dem Manubrium als Kraft- und dem Crus longum incudis als Lastarm; er berechnete wie später Stuhlmann (47) ein Hebelverhältnis von 1 : 1,5. Dahmann (14) und Gundersen (23) bestimmten mit dem Wert von 1 : 1,3 ein ähnliches Verhältnis wie v. Békésy (7).
Tonndorf (48) dagegen fand beim Menschen für jeden Punkt auf dem Manubrium ein eigenes Hebelverhältnis. Im Gegensatz zu v. Békésy (7), der eine aktive Trommelfellfläche von etwa 2/3 der Gesamtfläche annahm, bezog Tonndorf (49) in seine Berechnungen die gesamte Trommelfellfläche von 85 mm^2 ein und errechnete für den effektiven Hebel beim Menschen einen Wert kleiner 1. Bei Katzen ergab sich ein frequenzabhängiger Quotient aus Hammergriff- und Stapesschwingung

von 2,2 : 1, der bei Frequenzen kleiner 1000 Hz deutlich variierte. Mach und Kessel (37,38) sprachen schon 1875 von einer großen Variationsbreite aller Größen des Mittelohres.
Andere Autoren fanden keine Drucksteigerung durch die Gehörknöchelchenkette (Mink, (39)) oder bezweifelten zumindest ihre Notwendigkeit (7,54,59), da der Hörgewinn durch den Ossiculahebel nur ungefähr 2,5 dB ausmache. Hinzu kommt, daß die Verstärkung des Schalldruckes durch den von Helmholtz entdeckten trommelfelleigenen Hebel nach dem Prinzip der gekrümmten Membranen (24) und durch das nach Art einer Hydraulik wirkende Flächenverhältnis von Trommelfell und ovalem Fenster so groß ist, daß der Ossiculahebel im Vergleich dazu vernachlässigbar gering wird. (3,7,8,12,19,31,48,51,54,57)

3.3 Schutzfunktion

Eine weitere Aufgabe der Gehörknöchelchenkette liegt darin, zusammen mit den anderen Strukturen des Mittelohres (Trommelfell, Muskeln, Tuba auditiva), das Innenohr vor der Übertragung von zu starken Schallreizen zu schützen. Die Notwendigkeit eines solchen Schutzmechanismus wurde erstmals von Bezold (11) 1908 diskutiert. Auch beim primitiveren Gehörorgan

der Amphibien und Vögel sorgt eine Sollbruchstelle zwischen Columella und Extracolumella für den nötigen Schutz des Innenohres. (31,48,58)

Schon 1868 machte Helmholtz in seinen grundlegenden Arbeiten über das Mittelohr die Beobachtung, daß der Bewegungsspielraum des Hammers bei der In- und Exkursion unterschiedlich groß ist. In den von ihm beschriebenen "Sperrzähnen" an den Gelenkflächen von Hammer und Amboß fand er dafür das anatomische Substrat. Bei der Einwärtsbewegung greifen die Zähne von Hammer und Amboß ineinander und die Trommelfellbewegung wird auf das ovale Fenster übertragen. Bei der Auswärtsbewegung dagegen lösen sich Hammer und Amboß voneinander und ein Ausreißen des Stapes aus dem ovalen Fenster wird somit vermieden. (24,25,37,38) Bezold errechnete ein Verhältnis zwischen Ein- und Auswärtsbewegung des Hammers von der Ruheposition aus von 1 : 2, (11), Dahmann von 3 : 5 (14).
Der Bewegungsspielraum in den Kettengelenken führt bei der Einwirkung großer Schalldrucke zu einer Verzögerung der Schwingungen von Amboß und Stapes im Vergleich zu denen vom Hammer (14,19,21,37,38,44,48,49, 50).
Mach und Kessel (38) beschrieben eine Faserknorpelscheibe im Malleus-Incus-Gelenk, die ein Gleiten der

Gelenkflächen erlaubt, während Tonndorf (50) die Funktion des Gelenkes mit einer Reibungskupplung verglich, die das Gelenk bei lauten, niederfrequenten Schallreizen gleichsam entkoppelte. Beim Meerschweinchen, bei dem das Incudo-malleargelenk fehlt, fand Riecker 1948 (44) häufig Manubriumfrakturen und Stapesluxationen, hervorgerufen durch Schalldruckänderungen, wie sie bei heftigen Detonationen auftreten.
v. Békésy (8) fand schalldruckabhängige Bewegungsachsen der Ossicula. So geht die stempelartige Bewegung des Stapes um eine vertikale Achse bei hohen Schalldrucken in eine Taumelbewegung um eine horizontale Achse über.
Zusätzlich schützt auch das Trommelfell als Hemmband und als Sollbruchstelle (24), zusammen mit den Mittelohrmuskeln, das Innenohr vor zu starken Schalldrukken (8,11,14,37,38).

4. Schwingungsverhalten der Gehörknöchelchenkette im gesunden Mittelohr

Auch auf diesem Gebiet verdanken wir die Basis unserer heutigen Kenntnisse den Arbeiten von Helmholtz (24,25) und Mach und Kessel (37,38). Helmholtz versuchte unter Berücksichtigung aller anatomischen Details die Bewegungsabläufe abzuleiten, während Mach und Kessel durch Versuche mit Sonden, aufgeklebten Spiegeln und dem

Stroboskop zu ihren Ergebnissen kamen.

4.1 Lage der Bewegungsachsen

Helmholtz beschrieb die Bewegungen der Ossicula als annähernd gleich wie bei einem einzigen festen Körper. Nach ihm sind die Verschiebungen der Ossicula gegeneinander im Vergleich zur Amplitude der Schallschwingung so gering, daß man sie vernachlässigen kann; es resultiert eine gemeinsame Drehung um das Achsenband, d.h. eine Ein- und Auswärtsbewegung der Ossicula mit vom Hammer zum Stapes abnehmender Amplitude. Der Stapes führt im ovalen Fenster eine Kippbewegung aus (24).

Mach und Kessel fanden bei niederen Schalldrucken eine gemeinsame Bewegung der Ossicula um ihre Drehachse, während bei höheren Drucken die Drehung um verschiedene Achsen nacheinander stattfand und Wackelbewegungen in den Gelenken auftraten. Insgesamt fanden sie bei ihren Präparaten so große Variationen im Schwingungsverhalten, daß die Bestimmung einer allgemeingültigen Rotationsachse unmöglich wurde. Die Achsen variierten nicht nur in bezug auf die Ossicula, sondern auch in ihrer Lage zum Schädelinnern.

Dahmann (14), Groen (19) und Gundersen (23) beschrie-

ben in den darauffolgenden Jahren die Abhängigkeit der Schwingungsachsen der Gehörknöchelchenkette von der applizierten Schallstärke: bei hohen Schalldrukken hört die Kette auf, wie ein einzelner Körper zu schwingen, die Gelenkverbindungen geben nach und es stellen sich variable Torkel- und Wackelbewegungen ein.
v.Békésy dagegen sah den Grund für die Labilität im Schwingungsverhalten der Ossicula nicht in der Bewegung um mehrere variable Achsen, sondern in der Drehung um einen Drehpunkt, der an der Berührungsstelle von Crus breve incudis und der Mittelohrwand liegt.

4.2 Massenverteilung der Gehörknöchelchen

Die Tatsache, daß die drei Gehörknöchelchen im physiologischen Hörbereich so trägheitsarm wie ein einziger Körper auf den eintreffenden Schall reagieren können, liegt an der besonderen Massenverteilung der Gehörknöchelchen. Durch die Gewichte von Caput mallei und Corpus incudis rücken die Massenschwerpunkte so nahe an die Drehachse, daß die Gehörknöchelchen fast trägheitsfrei an ihrem Bandapparat aufgehängt sind. Aus diesem Grund entstehen auch bei Kopfdrehungen, Kaubewegungen und Atembewegungen keine störenden Geräuschwahrnehmungen (8,19,24).

4.3 Schwingungsformen des Stapes

Helmholtz (24) beschrieb die Bewegung des Stapes im ovalen Fenster als eine Kippbewegung, wobei der obere Rand etwas stärker als der untere Rand ins ovale Fenster eingedrückt wird. Diese Kippbewegung stellt nach v. Békésy (8) eine der wichtigsten Schutzmechanismen des Mittelohres dar. Nach seinen Beobachtungen bewegt sich der Stapes bei niederen Frequenzen um eine vertikale Achse, um bei hohen Frequenzen in eine Bewegung um eine horizontale Achse umzuschlagen. Kirikae (33, Kobrak (34), Mink (39) und Fumagalli (17) beschrieben ebenfalls eine Kippbewegung, während Mach und Kessel (37,38) und Cancura (12) komplizierte zusammengesetzte Schwingungsformen fanden. Eine stempelartige Bewegung des Stapes, d.h. eine Bewegung, bei der alle Punkte der Stapesfußplatte gleich weit ins ovale Fenster eingedrückt werden, ergibt sich aus Arbeiten von Aitkin (1), Guinan und Peake (22), Dankbaar (15) und Gundersen (23).

5. Schwingungsamplituden der Gehörknöchelchen

Die Untersuchung und Messung der Schwingungsamplituden der Gehörknöchelchen stieß in der Vergangenheit teils aus Mangel an geeigneten Instrumenten, teils wegen der geringen Bewegungsausschläge der Gehörknöchelchen

immer wieder auf große Schwierigkeiten. Die Amplituden, besonders am Stapes, erschienen vielen Untersuchern so klein, daß sie von atomaren Größenordnungen sprachen und ihre Werte für Amplitudenangaben meist durch Berechnungen und seltener durch Beobachtung und Messung gewannen (29,40,45).

II. Problemstellung

Der vorausgegangene Teil der Arbeit sollte einen Überblick über Funktion, Bewegungsform und Mechanik der Gehörknöchelchenkette geben und versuchen, einige bestehende Kontroversen aufzuzeigen: So die verschiedenen Auffassungen über die Wirkung der Gehörknöchelchenkette als Hebel oder doch die verschiedenen Werte, die für seinen Wirkungsgrad errechnet wurden; dann die verschiedenen Ansichten, die über die Bewegungen der Ossicula und die Lage der Achsen herrschen.
Mit einer neu entwickelten, mikrostroboskopischen Technik sollte deshalb versucht werden, das Schwingungsverhalten der Gehörknöchelchen zu untersuchen und die auftretenden Amplituden zu bestimmen.

III. Methoden

1. Allgemeines

1.1 Mechanische Sonden

Durch Aufkleben von ca. 10 cm langen Glasfäden an Hammer und Amboß vergrößerte Pollitzer 1861 (42) die Bewegungen innerhalb der Gehörknöchelchenkette so stark, daß er die Schwingungsvorgänge im Mittelohr beurteilen konnte. Die Anwendung solcher mechanischer Sonden führte aber durch die Zusatzbelastung zu Veränderungen der ursprünglichen Schwingungsform (38).

1.2 Kapazitative Sonden

Mit kapazitativen Sonden maß v. Békésy (5,6,8) die Änderung der durch die Bewegung der Gehörknöchelchen hervorgerufenen Kapazität in einem elektromagnetischen Feld. Zu seinen Versuchen verwendete er menschliche Felsenbeine.

1.3 Reflektionsbestimmungen mit aufgeklebten Spiegeln

Mach und Kessel versuchten in ihren Experimenten zur Erforschung der Topographie des Mittelohres die Verfälschung der Gehörknöchelchen-Schwingungen, die durch die mechanischen Sonden verursacht wurden, zu verringern. Sie klebten kleinste versilberte Glasspiegel auf den Hammergriff. Der reflektierte Licht-

strahl gab Hinweise auf die Bewegungsform der Gehörknöchelchen. Link (36) arbeitete ebenfalls mit dieser Methode, ebenso Dahmann (14).
In jüngster Zeit gelang es mit der Anwendung der Interferometrie (43,46), der Laser-Holographie (32) und der Ausnützung des Mössbauer-Effektes (18), auch kleinste Schwingungen auszumessen.

2. Stroboskopie

1875 machten sich Mach und Kessel für ihre Untersuchungen eine stroboskopische Technik zunutze. Sie erzeugten definierte Lichtblitze einer bestimmten Frequenz und unterhielten gleichzeitig mittels eines Pfeiftones eine Schwingung von annähernd derselben Frequenz. Auf diese Weise gelang es ihnen, die Schwingungsabläufe, die mit dem bloßen Auge nicht verfolgt werden konnten, so langsam erscheinen zu lassen, daß die Beobachtung möglich wurde.

2.1 Allgemeines

"Ähnlich wie bei der Technik von Mach und Kessel (38) kann eine rotierende Lochscheibe, deren Löcher jeweils den Beleuchtungsstrahl für einen Moment auf das Objekt auftreffen lassen, eine stroboskopische Betrach-

tung von schnellschwingenden Bewegungsvorgängen ermöglichen. Wird durch die Lochscheibe selbst zusätzlich auch der das Objekt in Schwingung versetzende Ton gesteuert, so ergibt sich auf mechanisch stabile Weise eine direkte Kopplung zwischen der Beleuchtungsfrequenz und der erregenden Tonfrequenz. Ein langsam schwingendes Bild entsteht, wenn zum tongenerierenden Signal aus der Lochscheibe auf elektronischem Wege einige Tonimpulse/sec. hinzuaddiert bzw. subtrahiert werden." (27)

Ein entsprechendes Mikrostroboskop (27) wurde für unsere Untersuchungen verwendet. Aufsatzstutzen für zwei Kameras ermöglichen zusätzlich eine stereoskopische Bildauswertung. Das Mikrostroboskop ist in ein Operationsmikroskop (C. Zeiss, OPMI I) integriert.

2.2 Technischer Aufbau des Mikrostroboskopes

"Das Mikrostroboskop gliedert sich in zwei Hauptbestandteile, den Beleuchtungsteil des Gerätes und die Vorrichtung zur Applikation der Schallreize auf das Trommelfell.

2.2.1 Beleuchtungsteil

In den Strahlengang des normalen Operationsmikroskopes

OPMI I wurde eine Lochscheibe so eingebaut, daß deren Öffnungen im Kreuzungspunkt des Beleuchtungsstrahles in Abhängigkeit von der Umdrehungsgeschwindigkeit der Lochscheibe für kurze Zeit Licht durchlassen. Auf diese Weise wird erreicht, daß das Beleuchtungsfeld nicht durch die Öffnungen der Lochscheibe begrenzt wird, sondern seine normale Ausdehnung behält."

"Das stroboskopisch koaxial parallaxenfrei beleuchtete Bild wird stereoskopisch unter Zwischenschaltung eines Vergrößerungswechslers in der Regel bei 16- bis 25- facher Vergrößerung beobachtet." (27)

2.2.2 Schallapplikation

Es wurde ein Druckkammersystem in Form eines geschlossenen Ohrtrichters entwickelt, das Druckschwankungen auf das Trommelfell übertragen kann. Die schräge Deckplatte besteht aus Glas, so daß man von außen auf das Trommelfell blicken kann. An der Seite eines dicht an diesem Ohrtrichter aufgebrachten abgeschrägten Ringes gibt ein Lautsprecher Schall ab. Die stabile Korrelation zwischen Tonhöhe und Beleuchtungsfrequenz und die Subtraktion oder Addition von einigen Tonimpulsen/sec. wird durch eine spezielle Elektronik gewahrt.

Eine besondere Schalltechnik ermöglicht es, das so entstehende langsam sich bewegende Bild an jedem beliebigen Punkt mittels Knopfdruck gleichsam anzuhalten. Bei der Auslösung dieses Kontaktes wird Lichtblitzzufuhr und Schallsignalphase schlagartig synchron. Dadurch wird die Fixierung der Endpunkte einer Schwingungsphase und somit die Messung der Amplitude sehr erleichtert.
Ferner gibt es die Möglichkeit, über weitere Regler einmal die Lautsprecherleistung zu variieren, zum anderen die Helligkeit der Lichtquelle über Änderung der Lampenspannung.

Mikrostroboskop zur Untersuchung von Bewegungsvorgängen am Ohr

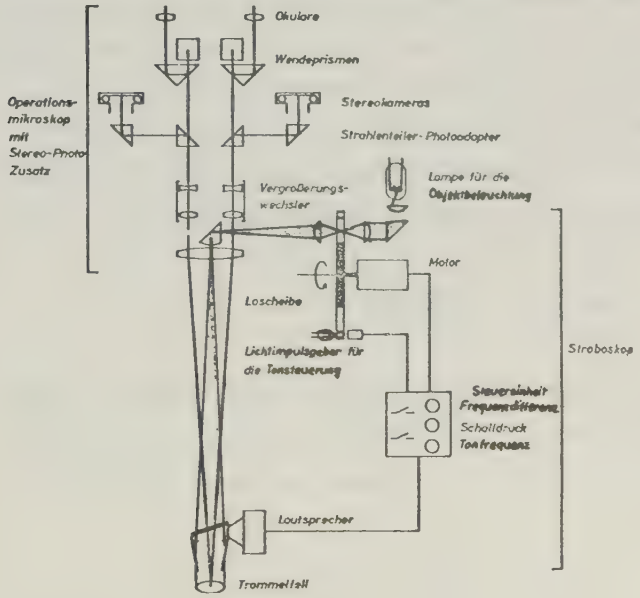

Abb. 1 Schematische Darstellung des Stereo-Mikrostroboskopes (nach Helms, 27)

IV. Experimentelle Untersuchungen

Das Schwingungsverhalten der Gehörknöchelchenkette und die Amplituden der einzelnen Ossicula wurden an 30 menschlichen Felsenbeinpräparaten untersucht.

1. Felsenbeinpräparate

1.1 Entnahme

Die von uns verwendeten Präparate stammten aus dem pathalogischen Institut der Universität Tübingen. Sie wurden 12 - 24 Stunden post mortem entnommen; besondere Sorgfalt wurde auf die Erhaltung von Mittel- und Innenohr verwandt, der äußere Gehörgang durfte nicht beschädigt werden. Die Abtrennung des Felsenbeins erfolgte im Bereich der mittleren Schädelgrube in einer Linie vom Kiefergelenk zum Kanal der Art. carotis interna und im Bereich der hinteren Schädelgrube entlang der Sutura petro - occipitalis.

1.2 Postmortale Veränderungen

Messungen von Schwingungen am Leichenpräparat lassen sich nur dann auf die Verhältnisse in vivo anwenden, wenn nachgewiesen werden kann, daß postmortale Ver-

änderungen diese Meßwerte nicht beeinflussen. Ohne eine geeignete Konservierungsmethode kommt es, wie aus der Literatur bekannt ist, schnell zur Austrocknung und damit zu einer zunehmenden Versteifung besonders der elastischen und bindegewebigen Strukturen des Ohres. Lagert man das Präparat feucht und bewahrt es so vor Austrocknung, treten entgegen der Ansicht von Rubinstein (45) nach unseren Erfahrungen postmortale Veränderungen, die die Schwingungsfähigkeit des Gehörknöchelchen-Systemes verändern, nicht auf. Auch Guelke und Keen (20), sowie Kobrak (34) und Gundersen (23) beobachteten bei geeigneter Lagerung keine postmortalen Schwingungsänderungen.

1.3 Lagerung

Die entnommenen Felsenbeinpräparate wurden aus obigen Gründen entweder sofort nach der Entnahme untersucht oder aber, da dies meist nicht möglich war, zunächst nach der Entnahme auf minus 20° C tiefgefroren. Zur Untersuchung wurden sie im Wasserbad 1 bis 2 Stunden aufgetaut und nach Abschluß der Experimente sofort wieder tiefgefroren. Bei dieser Aufbewahrungstechnik ließen sich identische Versuchsergebnisse noch nach Monaten erzielen.

1.4 Präparation

Unser Ziel mußte es sein, das Mittelohr so zu eröffnen, daß die für uns wichtigen Strukturen mit einer Einstellung des Operationsmikroskops überblickt werden konnten. Zusätzlich mußten wir berücksichtigen, daß unter stroboskopischer Beleuchtung nur Bewegungen, die rechtwinklig zum einfallenden Licht verlaufen, sowohl stereoskopisch als auch monocular gleichermaßen sichtbar werden, während Schwingungen parallel zur Achse des einfallenden Lichtes nur bei stereoskopischer Betrachtung in ihrem vollen Ausmaß zu beobachten sind.

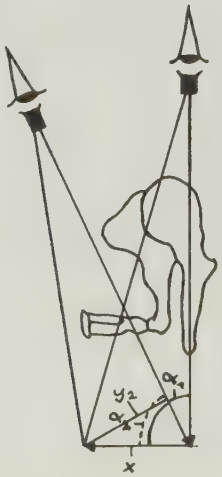

Abb. 2 Untersuchung des Einflusses verschiedener Blickwinkel (90° und 75°) auf die Meßgenauigkeit bei der Beobachtung der Gehörknöchelchenkette.

$\alpha_1 = 90^\circ$ $\qquad$ $\alpha_2 = 75^\circ$

$\sin 90^\circ = 1$ $\qquad$ $\sin 75^\circ = 0{,}9659$

$\sin \alpha = \frac{y}{x}$ $\qquad$ $y = \sin \alpha \cdot x$

wenn $\sin \alpha = 90^\circ \longrightarrow y = x$

Bei monocularer Betrachtung findet man das Bewegungsmaximum immer in der Ebene, die senkrecht zur Achse des einfallenden Lichtes liegt. Bei Änderungen des Winkels des einfallenden Lichtstrahles wird der Sinus des Einfallswinkels gleich dem Quotienten aus dem gemessenen Wert und der tatsächlich vorhandenen Amplitude; d.h., der Meßwert entspricht dem Produkt aus dem Sinus des Einfallswinkels und der tatsächlich vorhandenen Schwingungsamplitude. Es liegt also auf der Hand, daß zur Gewinnung eines möglichst genauen Ergebnisses der Sinus alpha gleich 1 werden muß; dies entspricht einem Winkel von 90° (vgl. Abb.2).
Bei einem Winkel von 75° entspricht Sinus alpha ungefähr dem Wert von 0,97, das bedeutet, daß man bei Messungen unter diesem Winkel einen Fehler von ca. 3% zu erwarten hat. Es muß deshalb bei der Einstellung des Mikrostroboskopes darauf geachtet werden, den Winkel größer als 75° zu halten.

Die vereisten Felsenbeine sägten wir mit einer Bandsäge so zurecht, daß nur noch Meatus externus, Mittel- und Innenohr unversehrt zurückblieben. Nach dem Absägen

des Mastoides senkrecht zur Schädelbasis am Hinterrand des äußeren Gehörganges wurde bei gut pneumatisierten Felsenbeinen meist das Antrum mastoideum eröffnet. Von hier aus legten wir mit einem Zahnarztbohrer die Fossa incudis im Recessus epitympanicus unter Schonung des Crus breve incudis und seiner Befestigungsbänder frei. Nachdem es uns jetzt möglich war, die Lage von Hammer und Amboß zu überblicken, entfernten wir das ganze Tegmen tympani bis auf die Ansatzstelle des Ligamentum capitis mallei. An der medialen Wand der Paukenhöhle trugen wir die Prominentia des lateralen Bogenganges ab, eröffneten den Canalis facialis, entfernten den Nervus facialis und konnten nun auch die Lage des Stapes überblicken. Da für uns auch die Bewegungen der Stapesfußplatte wichtig waren, eröffneten wir das Vestibulum von medial, so daß das ovale Fenster in seiner ganzen Ausdehnung überblickt werden konnte.

Jetzt war es möglich, mit einer Einstellung des Mikrostroboskopes die Innenfläche des Trommelfelles mit Manubrium, das Corpus mallei, den gesamten Incus, den Stapes und die Stapesfußplatte zu überblicken, ohne daß die Aufhängung der Gehörknöchelchen beschädigt wurde.

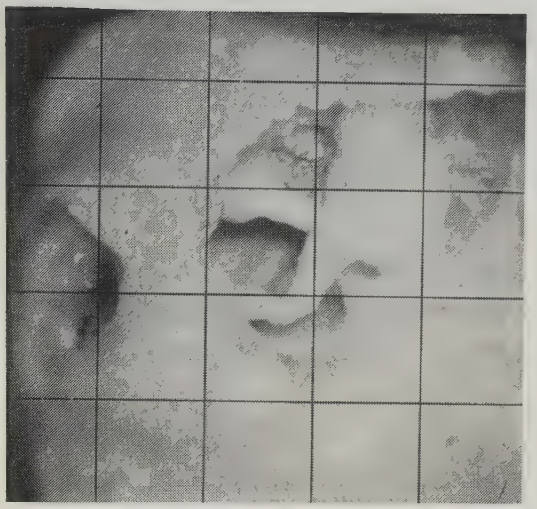

Abb. 3 Übersichtsaufnahme

Blick vom Antrum mastoideum aus auf Hammerkopf, Amboß und Stapes.

2. Versuchsanordnung

Der Ohrtrichter wurde in den äußeren Gehörgang eingeführt und schalldicht mit Plastilin gegen die Gehörgangswand abgedichtet. Beschallt wurde mit einer Intensität von 110 - 120 dB über einen Frequenzbereich von 200 bis 1700 Hz. Dabei fanden wir bei etwa 250 Hz bei allen 30 Felsenbeinpräparaten das Bewegungsmaximum der Ossicula. Bei 250 Hz strahlte der

verwendete Lautsprecher sein Energiemaximum ab.

Unsere Untersuchungen erfolgten immer unter folgenden Bedingungen: Objektivbrennweite 200 mm, Vergrößerungswechslerstellung 16- bis 25-fach, binokularer Geradtubus = 160 mm, Okulare 10-fach.

Bei der Auswahl unserer Meßpunkte an der Gehörknöchelchenkette war es unser Ziel, diejenigen Punkte zu finden, an denen maximale Bewegungsausschläge auftraten und die der Beobachtung durch das Mikrostroboskop gut zugänglich waren. So erhielten wir jeweils einen Meßpunkt an der Spitze des Manubrium mallei (Umbo), am Ende des Crus longum incudis (Processus lenticularis) und am hinteren oberen Rand der Stapesfußplatte. Diese so gewonnenen Meßpunkte markierten wir mit blauer Farbe.

3. Versuchsauswertung

3.1 Beobachtung und Beschreibung

Die Beobachtung und Beschreibung der Bewegungsvorgänge der Gehörknöchelchenkette ist die einfachste und unkomplizierteste Methode der Versuchsauswertung. Sie hat den großen Vorteil, daß sie ohne großen apparativen Aufwand durchgeführt werden kann und damit auch syste-

matische Fehler klein gehalten werden. Der entscheidende Nachteil dieser Methode liegt darin, daß bei der Auswertung keine nachprüfbare Dokumentation in Form von Bildern, Tabellen und Kurven möglich ist.

3.2 Photographische Auswertung

Anfänglich bot sich uns die monoculare photographische Auswertung an. Dabei war es das Ziel, durch möglichst lange Belichtungszeiten jeweils die volle Schwingung des Meßpunktes auf einem Bild festzuhalten. Da der Punkt während der Dauer der Belichtung nicht stillstand, sondern eine Strecke durchlief, wurden auf dem Bild jeweils nur seine Umkehrpunkte scharf abgebildet, während die übrigen Konturen sich unscharf darstellten. Die Tatsache, daß der Meßpunkt beim Durchlaufen einer Schwingung nur genau einmal die beiden Umkehrpunkte erreichte, sich aber die meiste Zeit irgendwo dazwischen befand, machte sehr lange Belichtungszeiten (bis zu 5 sec.) nötig. Dabei durchlief der Meßpunkt seine Schwingungsbahn mehrmals.
Die Technik des Mikrostroboskopes gestattete es uns, die Bewegungen des zu messenden Punktes an seinen Umkehrstellen beliebig lange anzuhalten und so eine bessere Abbildungsqualität der Amplitudenmaxima zu erreichen.

Trotz Ausschöpfung aller technischen Möglichkeiten blieben die Ergebnisse unbefriedigend. Das lag hauptsächlich daran, daß kein zufriedenstellender Kompromiß zwischen möglichst starker Vergrößerung und optimaler Tiefenschärfe gefunden werden konnte.
Vor ein weiteres Problem stellte uns das zur Verfügung stehende Filmmaterial. Der Film mußte einerseits extrem lichtempfindlich sein, andererseits durfte die Körnung nicht zu grob werden, um scharfe Abbildungen zu gewährleisten.

Aus diesen Gründen konnten wir nur von dem stärker schwingenden Meßpunkt am Manubrium auswertbares Filmmaterial erhalten, nicht aber vom Processuns lenticularis und der Stapesfußplatte, deren Amplituden zu gering waren.

Abb. 4 Aufnahme d. Umbo in Ruhe

Der Messpunkt verharrt scheinbar in Ruhe, da die Frequenzen des Tongebers und des Mikrostroboskops synchron sind.

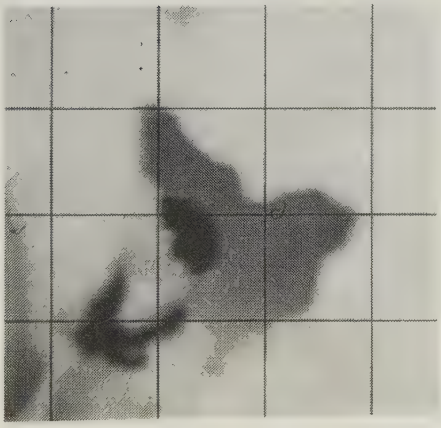

Abb. 5 Aufnahme d. Umbo in Bewegung

Die Unschärfen an den Rändern des Meßpunktes sind ein Maß für den Bewegungsausschlag.

(Die Frequenzen des Tongebers und des Mikrostroboskops stimmen nicht überein.)

Durch Eichung des optischen Systems anhand von Strukturen mit bekannter Oberflächenkonfiguration war es uns möglich, die Amplituden größenordnungsmäßig anzugeben.

3.3 Auswertung mit dem Okularmikrometer

Eine weitere unkomplizierte Methode, die Schwingungsamplituden der Gehörknöchelchen direkt im Experiment zu bestimmen, fanden wir in der Anwendung eines Okularmikrometers. Dabei wurde jeder Meßpunkt im Laufe von drei Tagen dreimal neu eingestellt und die volle Schwingung gemessen. Die Möglichkeit, die Bewegungen der Ossicula an jedem beliebigen Punkt stoppen zu können, war auch hier eine große Hilfe.

3.3.1 Eichung

Zur Eichung des Systems mußten lediglich bekannte Größen, durch das Mikroskop betrachtet, in Okularmikrometereinheiten ausgedrückt werden. So entspricht 1 mm bei der verwendeten Stellung des Vergrößerungswechslers (25-fach) 25 Einheiten auf dem Mikrometer.

3.3.2 Meßgenauigkeit

Da jedoch der gemessene Wert monocular ermittelt wurde,

galt auch hier die Forderung, den Einstellwinkel möglichst nahe bei 90° zu halten, da sonst die Genauigkeit der Messung abnahm (vgl. IV. 1.4). Zusätzlich wurde bei dieser Methode die Messung auch von subjektiven Faktoren beeinflußt; so mußte öfters zwischen Mikrometereinheiten interpoliert werden.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Meßwerte

Die Felsenbeine wurden möglichst schwingungsfrei eingespannt. Von jedem der drei Meßpunkte gewannen wir im Laufe von drei Tagen, nach jeweils neuer Einstellung unter dem Mikrostroboskop, drei Meßwerte, aus denen wir das arithmetische Mittel bildeten und so die Schwingungsamplitude errechneten.

Weiter setzten wir die Schwingungsamplituden an den einzelnen Meßpunkten zueinander ins Verhältnis, um so Vorstellungen über die Amplitudenrelation des Gehörknöchelchen-Hebels zu gewinnen.

Alle diese Werte hielten wir tabellarisch fest.

Daten: Vergrößerungswechslerstellung 25-fach
Okulare 10-fach
Frequenz 250 Hz
25 Mikrometer-Einheiten entsprechen 1 mm

Abkürzungen: P = Meßpunkt am Processus lenticularis
U = Meßpunkt am Umbo
SF = Meßpunkt an der Stapes-Fußplatte
FB = Felsenbein

Tab. 1

FB Nr.	Meß-punkt	Ausschläge (in E) 1.Mess.	2.Mess.	3.Mess.	Arith. Mittel(E)	Ampli-tude (E)
1	P	0,3	0,4	0,4	0,37	0,18
	U	1,9	1,7	1,9	1,8	0,9
	SF	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
2	P	0,5	0,7	0,8	0,7	0,34
	U	0,7	0,9	0,9	0,83	0,42
	SF	0,3	0,3	0,5	0,37	0,18
3	P	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
	U	0,3	0,4	0,4	0,37	0,18
	SF	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
4	P	0,9	0,8	0,8	0,83	0,42
	U	1,2	1,1	1,1	1,13	0,56
	SF	0,7	0,8	0,8	0,77	0,38
5	P	1,4	1,2	1,3	1,3	0,65
	U	1,8	1,8	1,7	1,77	0,88
	SF	0,7	0,7	0,7	0,7	0,35
6	P	0,2	0,3	0,2	0,23	0,11
	U	0,8	0,7	0,7	0,73	0,37
	SF	0,1	0,2	0,1	0,13	0,06

FB Nr.	Meß-punkt	Ausschläge (in E) 1.Mess.	2.Mess.	3.Mess.	Arith. Mittel(E)	Ampli-tude(E)
7	P	0,3	0,2	0,2	0,23	0,11
	U	0,5	0,4	0,3	0,4	0,2
	SF	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
8	P	0,7	0,8	0,7	0,73	0,36
	U	0,8	0,7	0,7	0,73	0,36
	SF	0,8	0,5	0,7	0,67	0,33
9	P	0,6	0,8	0,4	0,6	0,3
	U	1,4	1,2	1,2	1,27	0,63
	SF	0,5	0,4	0,3	0,4	0,2
10	P	0,7	0,8	0,8	0,76	0,38
	U	1,0	1,1	1,3	1,13	0,56
	SF	0,4	0,4	0,5	0,43	0,21
11	P	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15
	U	1,0	1,1	1,0	1,03	0,51
	SF	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
12	P	0,8	0,8	0,6	0,73	0,37
	U	2,2	1,9	2,1	2,07	1,03
	SF	0,2	0,3	0,4	0,3	0,15
13	P	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25
	U	0,9	0,8	0,9	0,87	0,43
	SF	0,3	0,4	0,4	0,37	0,18
14	P	0,3	0,4	0,4	0,37	0,18
	U	0,5	0,6	0,6	0,57	0,28
	SF	0,2	0,2	0,3	0,23	0,16
15	P	0,5	0,5	0,6	0,53	0,26
	U	0,9	0,7	0,7	0,76	0,38
	SF	0,4	0,3	0,4	0,37	0,18

FB Nr.	Meß-punkt	Ausschläge (in E) 1.Mess.	2.Mess.	3.Mess.	Arith. Mittel(E)	Ampli-tude(E)
16	P	0,6	0,5	0,5	0,53	0,26
	U	1,0	0,9	0,7	0,87	0,43
	SF	0,5	0,4	0,6	0,5	0,25
17	P	0,3	0,4	0,4	0,37	0,18
	U	1,1	1,2	1,2	1,17	0,59
	SF	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15
18	P	0,4	0,4	0,3	0,37	0,18
	U	1,3	1,1	1,3	1,26	0,63
	SF	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15
19	P	0,2	0,3	0,3	0,27	0,13
	U	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
	SF	0,1	0,2	0,2	0,17	0,08
20	P	0,7	0,4	0,5	0,53	0,27
	U	0,8	0,8	0,9	0,83	0,41
	SF	0,4	0,3	0,5	0,4	0,2
21	P	0,7	0,8	0,7	0,73	0,36
	U	2,0	1,9	1,9	1,67	0,83
	SF	0,3	0,3	0,4	0,33	0,16
22	P	1,0	0,9	1,0	0,97	0,48
	U	1,8	1,6	1,6	1,67	0,83
	SF	0,8	0,8	0,7	0,77	0,38
23	P	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25
	U	0,8	1,0	0,9	0,9	0,45
	SF	0,5	0,5	0,4	0,47	0,23
24	P	0,3	0,4	0,4	0,37	0,18
	U	0,6	0,7	0,7	0,67	0,33
	SF	0,4	0,2	0,4	0,33	0,17

FB Nr.	Meß-Punkt	Ausschläge (in E) 1.Mess.	2.Mess.	3.Mess.	Arith. Mittel(E)	Amplitude(E)
25	P	0,2	0,4	0,3	0,3	0,15
	U	0,7	0,6	0,7	0,67	0,33
	SF	0,2	0,1	0,2	0,17	0,08
26	P	0,2	0,2	0,1	0,17	0,08
	U	0,5	0,6	0,4	0,5	0,25
	SF	0,2	0,1	0,2	0,17	0,09
27	P	0,3	0,4	0,3	0,33	0,16
	U	1,2	0,9	1,0	1,03	0,52
	SF	0,3	0,2	0,3	0,27	0,13
28	P	0,9	0,8	0,8	0,83	0,42
	U	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5
	SF	0,6	0,8	0,8	0,73	0,37
29	P	0,9	1,0	0,8	0,9	0,45
	U	0,9	0,9	0,9	0,9	0,45
	SF	0,6	0,8	0,8	0,73	0,37
30	P	0,6	0,5	0,6	0,57	0,28
	U	0,7	0,8	0,5	0,67	0,33
	SF	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15

Tab.2

Die Übertragungsverhältnisse an den drei Meßpunkten.

Abkürzungen:

U(E) = Schwingungsamplitude am Meßpunkt des Umbo in Mikrometereinheiten (E)

P(E) = Schwingungsamplitude am Meßpunkt des Processus lenticularis in Mikrometereinheiten (E)

SF(E) = Schwingungsamplitude am Meßpunkt der Stapesfußplatte in Mikrometereinheiten (E)

FB = Felsenbein

FB Nr.	Verhältnisse U(E) : P(E)	U(E) : SF(E)	P(E) : SF(E)
1	5	18	3,6
2	1,3	2,3	1,8
3	1,8	3,6	2
4	1,1	1,5	1,1
5	1,4	2,5	1,9
6	3,4	6,2	1,8
7	1,8	4	2,2
8	1	1,1	1,1
9	2,1	3,2	1,5
10	1,5	2,7	1,8
11	3,4	10,2	3
12	2,8	6,7	2,5
13	1,7	2,4	1,4
14	1,6	1,8	1,1

FB Nr.	Verhältnisse U(%) : P(E)	U(E) : SF(E)	P(E) : SF(E)
15	1,5	2,1	1,5
16	1,7	1,7	1,1
17	3,3	3,9	1,2
18	3,5	4,2	1,2
19	2,3	3,8	1,6
20	1,5	2,1	1,4
21	2,3	5,2	2,3
22	1,7	2,2	1,3
23	1,8	2,0	1,1
24	1,8	1,9	1,1
25	2,2	4,1	1,9
26	3,1	2,8	0,9
27	3,3	4	1,2
28	1,2	1,4	1,1
29	1	1,2	1,2
30	1,2	2,2	1,9

Abb.6-9: Schematische Darstellung der Bewegungsabläufe, die wir bei unseren Untersuchungen an der Gehörknöchelchenkette beobachteten (Erläut.s.S.39ff.).

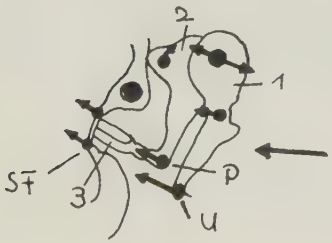

Abb. 6:
Schemat. Darstellung der Bewegungsrichtung u.-amplitude der Gehörknöchelchen an mehreren Punkten innerhalb der Kette in einer Übersicht. (1=Malleus,2=Incus,3=Stapes,U=Umbo, P=Proc.Lent.,SF=Stapesfußplatte).

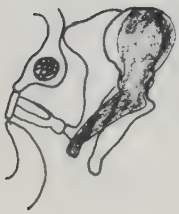

Abb. 7:
Isolierte Betrachtung der Malleusbewegung. Vereinfachte Darstellung der in Wirklichkeit aus vielen Komponenten mit unterschiedlicher Bewegungsrichtung u.-achse zusammengesetzt ist.

Abb. 8:
Isolierte Betrachtung der Incusbewegung, vereinfacht.

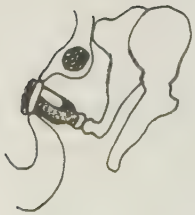

Abb. 9:
Isolierte Betrachtung der Stapesbewegung, vereinfacht.

Zusammenstellung der von uns an 30 Felsenbeinpräparaten gemessenen Maximal- und Minimalwerte für Hebelverhältnisse an den drei Messpunkten der Gehörknöchelchenkette sowie des arithmetischen Mittels:

Hebelverhältnis	U : P	U : SF	P : SF
maximal	5,0	18,0	3,6
minimal	1,0	1,1	0,9
arithm.Mittel	2,1	3,7	1,6

4.2. Beobachtungen

Die von uns beobachteten 30 Felsenbeinpräparate hatten alle die Tatsache gemeinsam, daß die Schwingungsamplitude vom Manubrium mallei zur Stapesfußplatte hin abnahm.

Bei 20 unserer Präparate fanden wir keine starren Gelenkverbindungen, sondern stellten fest, daß die Kettengelenke Bewegungsspielraum hatten und die Knöchelchen sich nur an den Hauptbewegungsrichtungen orientierten. Sie führten auch Torkel- und Wackelbewegungen aus und es entstanden somit äußerst komplizierte Bewegungsabläufe, die in ihren einzelnen Phasen

große Variabilität zeigten. Dies ist wahrscheinlich auf die hohen Schallintensitäten zurückzuführen, die wir applizierten. Das oben beschriebene Verhalten der Gehörknöchelchenkette ist wohl als Schutzmechanismus aufzufassen, dessen Sinn darin besteht, die Bewegungsausschläge zu verkleinern und das Innenohr vor Verletzungen zu schützen.

Als Drehachse des Hammers konnten wir in den meisten Fällen das Achsenband annehmen. Die größte Auslenkung fanden wir an der Spitze des Manubriums, im Umbobereich. Bei hohen Schallintensitäten trat nach unseren Beobachtungen zur reinen Rotationsbewegung eine Verschiebung des gesamten Malleus parallel zu seiner Längsachse hinzu, die vermutlich auf einer Dehnung des Achsenbandes beruhte.

Die Hauptbewegungsrichtung des Crus longum incudis lief parallel zu der des Manubrium mallei. Auch am Incus traten bei stärkerer Beschallung Taumelbewegungen auf, die hauptsächlich auf dem Verlust der starren Gelenkverbindung zum Malleus beruhten. Sie wurden besonders deutlich in der Fossa incudis sichtbar, wo das Crus breve eine kreisförmige Bewegung ausführte, die von seinen Haftbändern eingeschränkt wurde.

Die Gelenkverbindung zwischen dem Processus lenti-

cularis und dem Stapesköpfchen fanden wir meist fest. Der Stapes führte nach unseren Beobachtungen eine reine Stempelbewegung aus, d.h., alle Punkte der Stapesfußplatte wurden um den gleichen Betrag in das ovale Fenster verschoben.

V. Diskussion

Die von uns gefundene große Variationsbreite in den Schwingungsamplituden und den Übertragungsverhältnissen der einzelnen Gehörknöchelchen stimmt mit den Befunden von Gundersen (23) weitgehend überein. Auch er fand bei verschiedenen Präparaten unterschiedliche Amplituden, gab jedoch für ihre Verhältnisse konstante Werte an.

Auch Mach und Kessel (37,38) fanden bei der Analyse der Bewegungsformen der Ossicula und ihrer Achsen eine große individuelle Schwankungsbreite. Beyer (9) fand zusätzlich noch Unterschiede in Form und Ausbildung der Gehörknöchelchenkette.

Während Tonndorf (48,49), auch in Zusammenarbeit mit Khanna (50), bei verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Ossiculahebel annahm und für jeden Punkt auf dem Manubrium ein eigenes Hebelverhältnis berechnete, fanden wir bei unseren Untersuchungen an allen 30 Felsenbeinen unter den gleichen Versuchsbedingungen,

d.h.bei einer konstanten Frequenz von 250 Hz, gleicher Schallintensität und gleichem Schalldruck, völlig verschiedene und miteinander nicht vergleichbare Übertragungsverhältnisse der Ossicula. Es war uns also nicht möglich, für die Amplituden der Gehörknöchelchen und ihre Relationen allgemeingültige Werte zu finden, wie es in der Vergangenheit immer wieder versucht wurde. (3,5,6,7,8,12,14,19,21,23,24,25,47,54).

In Übereinstimmung mit Beyer (9), Cancura (12), Dahmann (14), Groen (19), Guelke (21), Gundersen (23), Mach und Kessel (38) und Tonndorf (48,49,50,51) beobachteten wir bei der Anwendung von hohen Schalldrucken zunehmende Bewegungsfreiheit im Hammer-Amboß-Gelenk. Die Gehörknöchelchen hörten auf, wie ein fester Körper zu schwingen; es stellten sich zusätzlich Wakkel- und Taumelbewegungen ein. Außerdem fanden wir eine Parallelverschiebung des Hammers entlang seiner Längsachse bei gleichzeitiger Rotation um das Achsenband. Das Crus breve des Incus führte in der Fossa incudis eine kreisende Bewegung aus. Lediglich die Gelenkverbindung zwischen Amboß und Stapes blieb fest.

So gewinnt in Übereinstimmung mit Helmholtz das Hammer-Amboß-Gelenk für den Schutz des Innenohres

an Bedeutung. Auch der Sinn des Gehörknöchelchen-Hebels scheint weniger in einer Verstärkung des Schalldrucks zu liegen, als vielmehr in einer Verkleinerung der im Verhältnis zur eingeschränkten Beweglichkeit der Stapesfußplatte meist sehr groß gefundenen Amplitude der Manubriumspitze bzw. des Umbo.

Bei der Beurteilung der Bewegung der Stapesfußplatte bestätigten unsere Beobachtungen die Angaben von Gundersen (23), Guinan und Peake (22), Dankbaar (15) und Aitkin (1), die eine reine Stempelbewegung beschrieben. Mach und Kessel (38) sprachen von einer kombinierten Kipp- und Drehbewegung. Dies, sowie kompliziertere Schwingungsformen, wie sie Cancura (12) annahm, wurde durch unsere Versuche ebensowenig bestätigt wie die Scharnier- oder Kippbewegung des Stapes im ovalen Fenster, wie sie v. Békésy (8), Kirikae (33), Fumagalli (17) und Kobrak (34) beschrieben.

Unsere Messungen erheben nicht den Anspruch, mit der Genauigkeit der Holographie oder Mössbauereffektes, die Schwingungsverhältnisse im Mittelohr anzugeben. Im Gegensatz zu diesen Untersuchungsmethoden gestattet die Analyse mit dem Mikrostroboskop eine Übersicht über den gesamten Bewegungsablauf. Die Variationsbreite der Bewegungsformen in der Gehörknöchelchenkette erscheint

danach größer als vermutet. Amplitudenrelationen von 0,9 : 0,05 bis 0,36 : 0,33 zwischen Umbo und Stapesfußplatte wurden festgestellt.
Die Berechnung eines Wirkungsgrades ist aus diesen Daten noch nicht möglich, da keine Messungen an der Fußplatte vorgenommen wurden.

VI. Zusammenfassung

Helms entwickelte in Zusammenarbeit mit C. Zeiss an der Univ.-HNO-Klinik Tübingen ein Stereomikrostroboskop, mit dessen Hilfe es uns möglich war, die Schwingungsamplituden der Gehörknöchelchen im menschlichen Felsenbeinpräparat zu beobachten und auszumessen.
Wir setzten die Schwingungsamplituden der drei Gehörknöchelchen zueinander ins Verhältnis und konnten so die Amplitudenrelationen an der Ossicula beurteilen.

Im Gegensatz zu Helmholtz (24), v.Békésy (5,6,7,8) und anderen, die einen für alle Mittelohren geltenden Wert für den Gehörknöchelchen-Hebel angaben, fanden wir in Übereinstimmung mit Mach und Kessel (37,38), Tonndorf (48,49) und Khanna (50,51) bei Schalldrukken um 110 dB große individuelle Variationen in der Lage der Schwingungsachsen, in der Schwingungsform und -amplitude der Gehörknöchelchen.

VII. Literaturverzeichnis:

1. Aitkin, L.M., Johnstone, B.M.: J. Exp. Zool. 180 (1972) 245; Middle ear function in a monotreme; the echidna (tachyglossus aculeatus).

2. Altmann, F.: Entwicklung des Ohres; Handb. HNO-Heilk., Bd. III, Teil 1, G. Thieme, Stuttgart, 1965, S. 1.

3. Austin, D!F.: Acta Otorhinolaryng. Belg. 24 (1970) Brux. S. 86 - 94; Ossicular reconstruction.

4. Austin, D.F.: Otolaryngologic Clinics of North America (1972) Vol. 5, No. 1, S. 145 - 160; Ossicular reconstruction.

5. Békésy, G.v.: Acta Oto-Laryng. (Stockholm) 27 (1939) 281; Über die mechanisch-akustischen Vorgänge beim Hören.

6. Békésy, G.v.: Acta Oto-Laryng. (Stockholm) 27 (1939) 388; Über die mechanisch-akustischen Vorgänge beim Hören.

7. Békésy, G.v.: Akust. Z. 6 (1941) 1; Über die Messung der Schwingungsamplitude der Gehörknöchelchen mittels einer kapazitativen Sonde.

8. Békésy, G.v.: Experimente in hearing; Mc Graw-Hill, New York, 1960.

9. Beyer, H.: Passow-Schäffer, Beiträge zur Anatomie des Ohres, Nase und Halses 6 (1913) 92; Zur Schalleitungsfrage.

10. Bezold: Arch. f. Ohr.-Nas.-u. Kehlk.Heilk. 75 (1908) 203; Experimentelle Untersuchungen über den Schalleitungsapparat des menschlichen Ohres.

11. Bezold: Arch. f. Ohr.-Nas.- u. Kehlk.-Heilk. 77 (1908) 19; Experimentelle Untersuchungen über den Schalleitungsapparat des menschlichen Ohres.

12. Cancura, W., F. Schwetz: Acta Oto-Laryng. (Stockh.) 55 (1962) 489; Zur Mechanik der Schallübertragung durch das Mittelohr.

13. Colombo, Realdo: De re anatomica Libri XV; Venedig 1559, deutsch Frankfurt 1609.

14. Dahmann, H.: Z. f. Hals-Nasen-Ohrenheilk. 24 (1929) 462; Zur Physiologie des Hörens; experimentelle Untersuchungen über die Mechanik der Gehörknöchelchenkette sowie über deren Verhalten auf Ton und Luftdruck.

15. Dankbaar, W.A.: J. of the Acoust. Soc. of Am., (1970) Bd. 48, Nr. 4 (Part 2), S. 1021 - 1022; The Pattern of Stapedial Vibration.

16. Frank, O.: Sitzungsber. d. bayerisch.Akademie, Math.-physik. Kl. 53 (1923) 64; Ergebnisse der Theorie für die Physiologie der Schalleitung.

17. Fumagalli, Z.: Arch. ital. die otol. 54 (1942) 569; Contributo alla conoscenza della struttura della lamina propria della membrana del. timpano umana.

18. Gilad, P., Shtrikman, S., Hillmann, P.: J. acoust. Soc. Amer. 41 (1967) 1232; Application of the Mössbauer method to ear vibration.

19. Groen, J.J.: Acta Oto-Laryng. (Stockholm) 40 (1951) 32; Funktional anatomy of hearing.

20. Guelke, R., Keen, J.A.: J. Physiol. 110 (1949) 226-236; A study of the vibrations of the tympanic membrane under direct vision, with a new explanation of their physical characteristics.

21. Guelke, R., Keen, J.A.: J. Physiol. 116 (1952) 175; A study of the movements of the auditory ossicles under stroboscopic illumination.

22. Guinan, J.J.Jr., Peake, W.T.: Acoust. Soc.Amer. 41 (1967) 1237; Middle ear characteristics of anesthetized cats.

23. Gundersen, T.: Arch. Otolaryng. 96 (1972) 416-422 Protheses in the ossicular chain. I. Mechanics of Movement.

24. Helmholtz, H.: Pflüger's Arch. Ges. Physiol. 1 (1868) 1; Die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells.

25. Helmholtz, H.: Über die Mechanik der Gehörknöchelchen; Wissenschaftliche Abhandlungen Joh. Ambrosius Barth, Leipzig 1883, Vol. 2, S. 503.

26. Helms, J.: Belg. HNO-Kongreß, Antwerpen 1973, Acta oto-rhino-Laryng. (Belg.) 28, S. 581 - 585; Mechanics of the middle ear.

27. Helms, J.: Univ. HNO-Klinik Tübingen; Habil.-Schrift, 1974. Experimentelle und klinische Untersuchungen zur Funktion des normalen, erkrankten und operierten Trommelfells.

28. Hough, J.D.: Arch. Oto-Laryng. (Chic.) 78 (1963) 335; Congenital malformations of the middle ear.

29. Johnstone, B.M., Taylor, K.H.: J. of Oto-Laryng. Soc. of Australia 3 (1971) 226; Physiology of the middle ear transmission system.

30. Johnstone, B.M., Sellick, P.M.: Quarterly reviews of biophysics 5 (1972) 1; The peripheral auditory apparatus.

31. Keidel, W.: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie; G. Thieme, Stuttgart, 1967.

32. Khanna, S.M., Tonndorf, J., Walcott, W.W.: J. Acoust. Soc. Amer. 44 (1968) 1555; Laser interferometer for the measurement of submicroscopic displacement amplitudes and their phases in small biological structures.

33. Kirikae, J.: Chapter II: The structure and function of the tympanic membrane; the structure and function of the middle ear. The university of Tokio - Press 1960.

34. Kobrak, H.G.: J. Acoust. Soc. Amer. 13 (1941) 179; A cinematographic study of the conduction of sound in the human ear.

35. Kobrak, H.G., Lindsay, J.R., Fournier, J.E., Rosen, S., Wilska, A., Wullstein, H., Zöllner, F.: The middle ear; University of Chicago-Press. Chicago, Illinois, U.S.A. (1959).

36. Link, R.: Hals-Nasen-Ohren-Arzt 33 (1943) 241; Zur Funktion der Membran des runden Fensters und des Schalleitungsapparates.

37. Mach, E., Kessel, J.: Arch. f. Ohrenheilk. 9 (1875) 284; Beiträge zur Topographie und Mechanik des Mittelohres.

38. Mach, E., Kessel, J.: Sitzungsbericht der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften (Wien) Math.-Naturw. Kl., 69, 3. Abt. 3 (1874) 221; Beiträge zur Topographie und Mechanik des Mittelohrs.

39. Mink, P.J.: Mschr. Ohrenheilk. 71 (1937) 1477 Über die Funktion des Trommelfells und Gehörknöchelchen.

40. Naftalin, L.: Life Sci.2 (1963) 101; The transmission of acoustic energy from air to the receptor organ in the cochlea.

41. Plester, D.: HNO (Berlin) 18 (1970) 33; Fortschritte in der Mikrochirurgie des Ohres in den letzten 10 Jahren.

42. Politzer, A.: Lehrbuch der Ohrenheilkunde; 4. Aufl. 1901, Verlag Ferdinand Enke (Stuttgart).

43. Powell, R.L., Stetson, K.A.: J. Opt. Soc. Amer. 55 (1965) 1593; Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction.

44. Riecker, E.O.: Arch. Ohren-Nasen-Heilk. 155 (1948) 194-205; Tierexperimentelle Untersuchungen der Veränderungen des Ohres nach Luftdruckschwankungen.

45. Rubinstein, M., Feldman, B., Fischler, H., Frei, E.H.: J. Acoust. Soc. Amer. 40 (1966) 1420; Measurement of stapedial footplate displacements during transmission of sound through the middle ear.

46. Schaetz: Über die Druckempfindlichkeit einer kreisförmigen Membran; Diss. München 1921, II. Sektion der philos. Fakultät.

47. Stuhlmann, O.jr.: J. Acoust. Soc. Amer. 9 (1937) 119; The non-linear transmission characteristic of the auditory ossicles.

48. Tonndorf, J.: Arch. f. klin. u. experim. Ohr.-Nasen-Kehlk.-Heilk. 205 (1973) 217 - 221; Die Physik des Mittelohres.

49. Tonndorf, J.: Acta Otorhinolaryng. Belg. 28 (1974) Brux. 425-441; New aspects of middle ear transmission.

50. Tonndorf, J., Khanna, S.M.: Arch. f. Nasen-Ohr.-Kehlk.-Heilk. 187 (1966) 431; Ein Beitrag zur Funktion des Mittelohres.

51. Tonndorf, J., Khanna, S.M.: J. of the Acoust. Soc. of Amer. 1966/513; Some proporties of sound transmission in the middle and outer ears of cats.

52. Tsukamoto, H., Nagami, H.: Arch. f. Nas.-Ohr.- u. Kehlk. 138 (1934) 236; Experimentelle Untersuchungen über den Mechanismus der Schalleitungskette.

53. Vesalius, A.: De humani corporis fabrica, Libris semptem.; Basel, 1543.

54. Wever, E.G., Lawrence, M., Smith, K.R.: Arch. Oto-Laryng. (Chicago) 48 (1948) 19; The middle ear in sound conduction.

55. Wever, E.G., Lawrence, M.: J. Acoust. Soc. Amer. 22 (1950) 460; The acoustic pathways to the cochlea.

56. Wever, E.G., Lawrence, M.: Physiological acoustics; Princeton University Press, 1954.

57. Wever, E.G.: The transmission of sound in the ear; Editor: Schuknecht, Otosclerosis, Little, Brown and Co. Boston (1962) 139.

58. Wever, E.G.: J. exp. Zool. 184 (1973) 97 - 126; The function of the middle ear in lizards: divergent types.

59. Wullstein, H.: Laryngoscope St. Louis 66 (1956) 1076-1093; Theory and practice of Tympanoplasty.

LEBENSLAUF

Am 29. Januar 1952 wurde ich, Beate Angelika Kreutzer, geb. Rauser, Tochter des Landwirts Rudolf Rauser und der Diplomlandwirtin Alice, geb. Kirner, als Älteste von fünf Kindern in Stuttgart-Bad Cannstatt geboren.

Mit sieben Jahren trat ich 1959 in die Volksschule Stuttgart-Hedelfingen ein. Vier Jahre später, 1963, wechselte ich auf das humanistische Georgii-Gymnasium in Eßlingen über. Anfang 1964 verzog ich mit meinen Eltern von Stuttgart nach Rottenburg am Neckar und besuchte dort den altsprachlichen Zug des Eugen-Bolz-Gymnasiums bis zur neunten Klasse. Um meine humanistische Ausbildung mit dem Abitur beenden zu können, mußte ich auf das Uhland-Gymnasium in Tübingen überwechseln. Dort bestand ich im Juni 1971 das Abitur.

Im Wintersemester 1971/72 wurde ich zum Studium der Medizin an der Universität Tübingen zugelassen.

Im September 1972 legte ich die naturwissenschaftliche, im März 1974 die ärztliche Vorprüfung ab.

Im klinischen Teil des Studiums bestand ich nach dem zweiten Semester, März 1975, nachdem inzwischen die neue Approbationsordnung für Ärzte in Kraft getreten war, den ersten Teil der ärztlichen Prüfung, nach dem sechsten Semester, März 1977, den zweiten Abschnitt und nach dem achten Semester, am 28. April 1978, den dritten Teil.

Am 2. Mai 1978 erhielt ich die Approbation als Arzt.

Während meines klinischen Studiums schrieb ich bei Prof. Dr. med. Helms, dem jetzigen Direktor der Universitäts-HNO-Klinik in Mainz, meine Dissertation über das Thema: „Experimentelle Untersuchungen über die Mechanik der Gehörknöchelchenkette unter Berücksichtigung der Stapesfußplatte".

city schnelldruck, marcusstraße 10, 8700 würzburg